

## СТРУКТУРА, КАК ОСНОВА СИСТЕМЫ КАЧЕСТВА В ТРУБНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

### STRUCTURE AS A BASIS OF QUALITY EVALUATION IN PIPE PRODUCTION

Казаков А.А., Киселев Д.В., Пахомова О.В.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
195220, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, kazakov@thixomet.ru

Standards currently used for a quality assessment of tube plate have been out of date and cannot be used for the description of its quality and application properties. The hardware-software motorized device Thixomet Smart Drive for an objective quantitative estimation of all types of structural heterogeneity in modern tube steels – microstructural banding, general anisotropy, blocks of bainite with lath morphology, centerline segregation – was developed, realized and installed in tens enterprises and organizations. All developed standards or are unique and have no analogs (general anisotropy and blocks of bainite with lath morphology), or are compatible but surpass in efficiency and objectiveness of quality estimation operating local (GOST 5640) and foreign (ASTM 1268, GB/T 13298) standards. It was established that structural heterogeneity estimated by a volume fraction and size of extended areas of bainite with lath morphology streamlined along rolling direction adequately describes mechanical properties at tensile and impact bending tests of pipeline steels with yield strength from 485 up to 625 N/mm<sup>2</sup>. The found "structure- properties" relationships can be used as a background for quality estimation system including acceptance test of steel products between suppliers and consumers of the plate, and also for the improvement of through technology of its production.

Сегодня при производстве труб для магистральных трубопроводов основными характеристиками, по которым производят приемосдаточные испытания штрипса, являются механические свойства: прочность на растяжение, ударная вязкость, ИПП, измеренные при комнатных и низких климатических температурах. Структура учитывается факультативно размером зерна по ГОСТ 5639 и полосчатостью по ГОСТ 5640. Металлургическое качество оценивается содержанием неметаллических включений по ГОСТ 1778-70. Отметим, что все стандарты относятся к состоянию технологии 60-70-х годов прошлого века. Более того, ни полосчатость, ни содержание неметаллических включений при современном состоянии технологии производства трубных сталей не являются лимитирующим фактором, определяющим их потребительские свойства. Сегодня полосчатость актуальна только для феррито-перлитных сталей низких категорий прочности. С внедрением системы ускоренного охлаждения после чистовой прокатки формируется не феррито-перлитная, а феррито-бейнитная или бейнитная структура, поэтому структурная полосчатость в таких сталях практически отсутствует, а дисперсность структуры характеризуется не столько размером зерна феррита, который практически невозможно выделить в феррито-бейнитных сталях, сколько дисперсностью и морфологией элемента структуры с учетом всех ее составляющих. Эффективно проведенная внепечная обработка позволяет снизить содержание включений по ГОСТ 1778-70 ниже второго балла или до тысячных долей в объемных процентах по ASTM E 1245. Такое низкое содержание неметаллических включений не оказывает негативного влияния на свойства стали. Напротив, дисперсные, равномерно распределенные неметаллические включения являются основой «оксидной металлургии», разрабо-

танной Nippon Steel [1]. Именно на таких включениях, как на подложках, образуется игольчатый феррит, обеспечивающий наилучшее сочетание прочности и вязкости разрушения сталей. Таким образом, набор структурных характеристик, используемых в настоящее время для приемосдаточных испытаний трубных сталей, устарел и не может характеризовать потребительские свойства штрипса.

Более того, механические свойства, определенные даже на полнотолщинных образцах, не в полной мере характеризуют потребительские свойства стали. При этих испытаниях результат зависит от места пробоотбора, а значит особенностей структуры штрипса, наследуемой от сляба с учетом влияния технологии контролируемой прокатки. Учитывая, что современная технология не обеспечивает изотропную структуру, одинаковую по площади и толщине листа, «разброс» значений при механических испытаниях может быть значительным. Это означает, что результаты приемосдаточных испытаний не могут быть использованы для обобщения опыта и установления значимых взаимосвязей «структура-свойства», так как непонятно к какой структуре эти свойства относятся: свойства определяют на одних образцах, а структуру – на других. Только структура непосредственно под поверхностью разрушения, адекватно «оцифрованная» по представительной площади, может быть использована для установления взаимосвязи «структура-свойства».

Известно, что структура стали определяет ее свойства. Поэтому, если правильно «оцифровать» структуру с помощью современных методов количественной металлографии, то именно структура, а не механические свойства, сможет более объективно характеризовать потребительские свойства штрипса. Безусловно, для такого прогноза

свойств по структуре необходима обширная база данных «структура-свойства».

Вопрос о целесообразности использования структуры, как выходной характеристики, позволяющей оценить потребительские свойства штрипса, уже не является дискуссионным. Известно [2], что новый толстолистовой стан введен в эксплуатацию на заводе компании Xiangtan Iron and Steel. На стане можно производить порядка 2 млн. т. толстолистого проката до 4,8 м. Наряду с обычным сортаментом на двухклетевом стане можно прокатывать высокопрочный лист класса X80. Концерн Siemens спроектировал и поставил все основные узлы стана, включая черновую и чистовую клетки с КИП и автоматикой. Этот стан впервые оснащен так называемым монитором микроструктуры, изначально разработанным Siemens для станов горячей прокатки, который позволяет прогнозировать механические свойства листового проката и даже частично отказаться от соответствующих испытаний. К сожалению, публикация этой информации не дает деталей такого контроля.

В связи с вышеизложенным, представляются актуальными задачи, решенные в настоящей работе:

1. разработаны методики оценки структуры для «оцифровки» всех форм структурной неоднородности современных трубных сталей,
2. найдены взаимосвязи «структура-свойства» для сталей разных категорий прочности для большинства механических свойств, входящих в приемо-сдаточные испытания.

Для оценки микроструктурной полосчатости феррито-перлитной стали по ГОСТ 5640 используют метод сравнения с эталонными шкалами, построенными по принципу возрастания количества полос перлита с учетом их сплошности и степени вытянутости ферритного зерна.

Следующее поколение современных трубных сталей имело феррито-бейнитную структуру, а размер зерна стал намного меньше, поэтому для них были разработаны новые стандартные шкалы, построенные по тому же принципу, что и шкалы ГОСТ 5640.

Для повышения точности и объективности оценки микроструктурной полосчатости в листовом и рулонном прокате трубных сталей феррито-бейнитного класса разработали автоматизированную методику с использованием анализатора изображений. В этой методике с помощью метода направленных секущих рассчитывали стереологические параметры, характеризующие взаимное расположение элементов микроструктуры (феррита и бейнита). На основе данных параметров, а также с учетом анизотропии ферритного зерна назначали балл соответствующей шкалы.

Современные трубные стали получают с использованием эффективных систем ускоренного охлаждения в конце чистовой прокатки, поэтому такие стали имеют почти полностью бейнитную структуру, а микроструктурная полосчатость в них отсутствует. Тем не менее, в таких сталях можно наблюдать анизотропию микроструктуры. Методы

стереологии, которые использовались для оценки феррито-бейнитных структур предусматривают выделение элементов микроструктуры, что затруднительно в данном случае, ввиду сложной морфологии бейнита. Для таких микроструктур был разработан метод оценки анизотропии бейнита, основанный на методах текстурного анализа. Для вычисления коэффициента анизотропии, использовались текстурные признаки, определяемые на основе матрицы совместной встречаемости уровней серого. При использовании данных методов нет необходимости в выделении элементов микроструктуры, что позволяет оценивать микроструктуры сложной морфологии и повышает объективность оценки. Определенный с помощью этого метода коэффициент однозначно характеризует анизотропию сталей бейнитного класса.

Как показали исследования, среди разнообразных морфологических форм бейнита есть такой, обширные блоки которого во многом определяют негативное влияние на механические свойства стали. Это бейнит речной морфологии. Разработана методика травления, позволяющая однозначно выделять бейнит такой морфологии и производить измерения с помощью анализатора изображений его объемного содержания и протяженности продольных межфазных границ, во многом определяющих механические свойства трубных сталей этого класса.

Большинство известных стандартов оценки качества проката предусматривают исследование образцов, отобранных от четверти толщины листа, не принимая во внимание центральную область. В этой области, как правило, содержатся грубые следы зональной ликвации, которые невозможно фрагментировать при прокатке и которые оказывают негативное влияние на механические свойства листа. Ликвационная полоса это наиболее грубое проявление неоднородности и анизотропии в штрипсе.

Разработана методика количественной оценки развития ликвационной полосы в листовом прокате с помощью коэффициента микроструктурной неоднородности (КМН) [9], который рассчитывается по локальному удельному превышению микротвердости в осевой зоне. Было показано, что КМН является однозначной характеристикой сегрегации всех основных легирующих и примесных элементов стали, поэтому может служить объективной количественной характеристикой развития ликвационной полосы. Однако эта методика, ввиду своей трудоемкости, применима только для исследовательских целей, для рутинного же контроля требуется разработать более простой и в то же время объективный метод оценки.

За основу были взяты эталоны методики GB/T 13298. Для изображения микроструктуры центральной зоны, полученного при увеличении 200х, вычисляются средние значения уровня серого на секущих, параллельных линии прокатки ( $M(y)$ ), колебания которых отражают наличие темных полос на изображении. С помощью дис-

кретного преобразования Фурье рассчитывается спектр функции  $M(y)$ .

Методом экспертных оценок установлено, что амплитуда гармоник в диапазоне частот от 0 до  $0,05 \text{ мкм}^{-1}$  наилучшим образом описывает степень развития ликвационной полосы в соответствии с эталонными шкалами. Таким образом, рассчитывается сумма амплитуд гармоник в данном диапазоне частот ( $L$ ).

Уравнение регрессии, используемое для назначения балла, имеет следующий вид:

$$B = -3,56 + 0,08 * L \quad (1)$$

Таким образом, разработан пакет методов количественной оценки структурной неоднородности штрипса, охватывающий все известные типы неоднородности, фиксируемые в оптический микроскоп.

Установлено, что структурная неоднородность, оцениваемая объемной долей и размером протяженных областей бейнита речной морфологии, вытянутых вдоль направления прокатки, адекватно описывает механические свойства при растяжении и ударном изгибе листового проката штрипсовых сталей с пределом текучести от 485 до  $625 \text{ Н/мм}^2$ . Найденные закономерности «структурасвойства» могут послужить основой системы качества, в частности, использованы для приемосдаточного контроля металлопродукции между поставщиками и потребителями штрипса, а также для совершенствования сквозной технологии его получения.

## Литература

1. Shigeaki Ogibayashi, Advances in Technology of Oxide Metallurgy. Nippon steel technical report. No. 61 April 1994. – 76 с.
2. Новости металлургии по странам и регионам. Китай. Новый толстолистовой стан компании Xiangtan. Черные металлы. 2010, №12, с. 10.
3. А. Салтыков. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1970. - 376 с.
4. Казаков А.А., Киселев Д.В., Андреева С.В., Чигинцев Л.С., Головин С.В., Егоров В.А., Марков С.И. Разработка методики количественной оценки микроструктурной полосчатости низколегированных трубных сталей с помощью автоматического анализа изображений. Черные металлы. №7-8. 2007, с. 31-37.
5. Прэнт У.К. Цифровая обработка изображений. Пер. с англ. - М.: Мир, 1982. –Кн.1 -312 с. (William K. Pratt. Digital Image Processing. - A Willey - Interscience Publication. John Willey and Sons. 1978.)
6. Малахов Н.В., Мотовилина Г.Д., Хлусова Е.И., Казаков А.А. Структурная неоднородность и методы ее снижения для повышения качества конструкционных сталей. Вопросы материаловедения. №3(59), 2009, с.52-64.
7. Патент РФ №2449055. Способ исследования структуры трубных сталей.
8. А.А.Казаков, Е.И.Казакова, Д.В.Киселев, Г.Д.Мотовилина. Разработка методов оценки микроструктурной неоднородности трубных сталей. Черные металлы. №12. 2009, с. 12-15.
9. Казаков А.А., Чигинцев Л.С., Казакова Е.И., Рябошук С.В., Марков С.И. Методика оценки ликвационной полосы листового проката. Черные металлы. №12. 2009, с.17-22.